

© Н. Г. МУСАКАЕВ¹, М. К. ХАСАНОВ²

¹Тюменский государственный университет

¹Тюменский филиал Института теоретической
и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН

²Стерлитамакский филиал

Башкирского государственного университета

musakaev@ikz.ru, hasanovmk@mail.ru

УДК 532.546, 536.421

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА
НАГНЕТАНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА
В НАСЫЩЕННЫЙ МЕТАНОМ И ЕГО ГИДРАТОМ ПЛАСТ***

**MATHEMATICAL MODELING OF CARBON DIOXIDE
INJECTION PROCESS IN RESERVOIR SATURATED
WITH METHANE AND ITS HYDRATE**

В статье представлена математическая модель и исследование особенностей процесса образования газового гидрата при нагнетании углекислого газа в пористую среду, насыщенную в исходном состоянии метаном и его гидратом. Построены автомодельные решения осесимметричной задачи, описывающие распределения основных параметров в пласте. Показано, что существуют решения, согласно которым процесс может происходить как без диссоциации исходного газогидрата на метан и воду, так и с ней. Построены критические диаграммы существования решений каждого типа.

We introduce the mathematical model and study the process peculiarities of gas hydrate formation at the injection of carbon dioxide into the porous medium initially saturated with methane and its hydrate. Self-similar solutions of the axisymmetric problem that describe the distribution of main parameters in the reservoir are obtained. It is shown that there are solutions, according to which the process can occur without dissociation of the source gas hydrate into methane and water, as well as with dissociation. The critical diagrams of solution existence for each type are built.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Газовый гидрат, диссоциация, процесс замещения, диоксид углерода, пористая среда, осесимметричная постановка, автомодельное решение.

KEY WORDS. Gas hydrates, dissociation, exchange process, carbon dioxide, porous medium, axisymmetrical formulation, self-similar solution.

* Исследование проведено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 14-01-31089) и гранта для поддержки ведущих научных школ РФ (НШ-2669.2014.1).

Введение

Газовые гидраты — это нестехиометрические кристаллические соединения, образующиеся при высоких давлениях и низких температурах из воды и газа. Основная их часть сосредоточена в акватории Мирового Океана и на суше в зонах вечной мерзлоты [2, 3]. В настоящее время основными методами добычи природного газа из газогидратных залежей являются снижение давления, нагрев и закачка ингибиторов гидратообразования [5, 7, 8]. При использовании этих методов происходит разложение газовых гидратов, что может привести к снижению механической прочности коллектора и к последующим негативным последствиям (провалы, оползни и т. п.) [9]. С другой стороны, одной из экологических проблем являются массивные выбросы углекислого газа в атмосферу, что вызывает необходимость в его утилизации. Перспективным решением двух задач (добыча метана из газогидратных залежей и подземная утилизация двуокиси углерода) представляется технология замещения, заключающаяся в вытеснении метана из гидратов посредством заполнения их углекислым газом [6, 9]. При этом, как отмечено в работе [6], механизмы образования гидратов в месторождениях природного газа пока недостаточно изучены, поэтому исследование процесса закачки газообразного диоксида углерода с переходом в гидратное состояние может иметь первостепенное значение.

Существенной особенностью процесса замещения метана двуокисью углерода в метаногидрате является экзотермический характер данной реакции, т. е. она происходит с выделением тепла, т. к. на единицу объема скрытая теплота образования гидрата углекислого газа примерно на 10% больше скрытой теплоты разложения гидрата метана (на воду и газ) [9]. Вследствие выделения тепла и нагрева пористой среды, к процессу замещения возможно подключение процесса диссоциации гидрата метана с появлением в порах воды, что, с одной стороны, интенсифицирует процесс выделения метана, но с другой — может привести к снижению механической прочности пород.

Постановка задачи и основные уравнения

Пусть имеется горизонтальный пористый пласт, насыщенный метаном и его гидратом. Давление p_0 и температура T_0 пласта в исходном состоянии соответствуют термодинамическим условиям существования гетерогенной смеси метана и его гидрата. Через скважину, вскрывшую пласт на всю толщину, закачивается углекислый газ, в результате чего в пористой среде формируются две характерные области. В первой (ближней) области поры насыщены углекислым газом и его гидратом, а во второй (дальней) — метаном и его гидратом. Т. е., в работе принимается, что замещение метана диоксидом углерода в составе гидрата полностью происходит на подвижной фронтальной поверхности, разделяющей эти две зоны.

Примем следующие допущения. Процесс однотемпературный, т. е. температуры пористой среды и насыщающего вещества совпадают. Гидраты CO_2 и CH_4 являются двухкомпонентными системами с соответствующими массовыми концентрациями $G_{(d)}$ и $G_{(m)}$. Аналогично работе [6], течение в пористой среде будем считать ламинарным. Скелет пористой среды и газогидрат несжимаемы, пористость постоянна, углекислый газ и метан являются калорически совершенным газом.

Система основных уравнений при сделанных допущениях в осесимметричной постановке будет иметь следующий вид [10]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(mS_{(i)}\rho_{(i)}) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rmS_{(i)}v_{(i)}\rho_{(i)}) &= 0, \quad (i = d, m) \\ mS_{(d)}v_{(d)} &= -\frac{k_{(d)}}{\mu_{(d)}}\frac{\partial p_{(1)}}{\partial r}, \quad p_{(1)} = \rho_{(d)}R_{g(d)}T_{(1)}, \\ mS_{(m)}v_{(m)} &= -\frac{k_{(m)}}{\mu_{(m)}}\frac{\partial p_{(2)}}{\partial r}, \quad p_{(2)} = \rho_{(m)}R_{g(m)}T_{(2)}, \quad k_{(i)} = k_0S_{(i)}^3 \quad (i = d, m), \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho c T_{(1)}) + mc_{(d)}S_{(d)}v_{(d)}\rho_{(d)}\frac{\partial T_{(1)}}{\partial r} &= \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda\frac{\partial T_{(1)}}{\partial r}\right), \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho c T_{(2)}) + mc_{(m)}S_{(m)}v_{(m)}\rho_{(m)}\frac{\partial T_{(2)}}{\partial r} &= \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda\frac{\partial T_{(2)}}{\partial r}\right). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь и далее нижние индексы в скобках d и m относятся, соответственно, к параметрам CO_2 и CH_4 , параметры областей снабжены нижним индексом в скобках 1 и 2; $\rho_{(i)}$, $v_{(i)}$, $k_{(i)}$, $R_{g(i)}$, $c_{(i)}$ и $\mu_{(i)}$ ($i = d, m$) — истинная плотность, скорость, проницаемость, газовая постоянная, удельная теплоемкость и динамическая вязкость i -й фазы; m — пористость; p — давление; T — температура; $S_{(i)}$ ($i = d, m$) — насыщенность пор i -й фазой; ρc и λ — удельная объемная теплоемкость и коэффициент теплопроводности системы.

Значения температуры и давления на кривой трехфазного равновесия «газ-вода-гидрат» выражаем условием фазового равновесия [1]:

$$T = T_0 + T_* \ln(p/p_{s0}), \quad (2)$$

где p_{s0} — равновесное давление, соответствующее температуре T_0 , T_* — эмпирический параметр, зависящий от вида газового гидрата.

На границе между первой и второй областями выполняются соотношения, которые следуют из условий баланса массы и тепла [4]:

$$\begin{aligned} mS_{(i)}\rho_{(i)}(v_{(i)} - \dot{r}_{(n)}) &= mS_{h(i)}\rho_{h(i)}G_{(i)}\dot{r}_{(n)}, \quad (i = d, m), \\ mS_{h(d)}\rho_{h(d)}(1 - G_{(d)})\dot{r}_{(n)} &= mS_{h(m)}\rho_{h(m)}(1 - G_{(m)})\dot{r}_{(n)}, \\ \lambda\frac{\partial T_{(1)}}{\partial r} - \lambda\frac{\partial T_{(2)}}{\partial r} &= m(S_{h(d)}\rho_{h(d)}L_{h(d)} - S_{h(m)}\rho_{h(m)}L_{h(m)})\dot{r}_{(n)}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\rho_{h(i)}$, $S_{h(i)}$ и $L_{h(i)}$ ($i = d, m$) — плотность, насыщенность и теплота образования гидрата CO_2 и CH_4 соответственно; $\dot{r}_{(n)}$ — скорость движения границы фазовых переходов. Температура и давление на этой границе полагаются непрерывными.

Для замыкания системы уравнений (1)-(3) зададим граничные условия. Положим, что через скважину, вскрывшую пласт на всю толщину, закачивается углекислый газ с постоянным массовым расходом Q (на единицу высоты сква-

жины) и температурой T_w . С учетом закона Дарси условия на границе скважины имеют вид:

$$r = r_w \rightarrow 0 \quad (t > 0): \quad \frac{k_{(d)}\pi}{\mu_{(d)}R_{g(d)}T_w} \left(r \frac{\partial p_{(1)}^2}{\partial r} \right) = Q, \quad T = T_w,$$

при $r \rightarrow \infty \quad (t > 0): \quad T = T_0, \quad p = p_0$.

Насыщенность пласта гидратом метана во второй области равна v . Тогда, на основе второго уравнения системы (3), представляющего условие баланса массы воды, связанной в газогидрате, можно найти величину гидратонасыщенности в первой зоне:

$$S_{h(d)} = \rho_{h(m)}(1 - G_{(m)})v / \rho_{h(d)}(1 - G_{(d)}).$$

Автомодельное решение

Введем автомодельную переменную $\xi = r / \sqrt{\chi^{(T)} t}$ ($\chi^{(T)} = \lambda / \rho c$ — коэффициент температуропроводности пласта).

В рассматриваемой задаче перепады температур $\Delta T = T_w - T_0$ в области фильтрации небольшие ($\Delta T \ll T_0$). Поэтому в уравнении пьезопроводности слагаемое, отвечающее за переменность температуры, несущественно. С учетом этого, на основе системы (1), уравнения пьезопроводности и температуропроводности для переменной ξ запишутся в виде:

$$\begin{aligned} -\xi \frac{dp_{(j)}^2}{d\xi} &= \frac{2\chi_{(j)}^{(p)}}{\chi^{(T)}} \frac{1}{\xi} \frac{d}{d\xi} \left(\xi \frac{dp_{(j)}^2}{d\xi} \right), \quad (j = 1, 2), \\ -\xi \frac{dT_{(j)}}{d\xi} &= \frac{2\text{Pe}_{(j)}}{p_0^2} \frac{dp_{(j)}^2}{d\xi} \frac{dT_{(j)}}{d\xi} + \frac{2}{\xi} \frac{d}{d\xi} \left(\xi \frac{dT_{(j)}}{d\xi} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{где } \chi_{(1)}^{(p)} = \frac{k_{(d)}p_{(1)}}{m(1 - S_{h(d)})\mu_{(d)}}, \quad \chi_{(2)}^{(p)} = \frac{k_{(m)}p_{(2)}}{m(1 - S_{h(m)})\mu_{(m)}}, \quad \text{Pe}_{(1)} = \frac{\rho_{(d)}p_0c_{(d)}k_{(d)}}{2\lambda\mu_{(d)}},$$

$$\text{Pe}_{(2)} = \frac{\rho_{(m)}p_0c_{(m)}k_{(m)}}{2\lambda\mu_{(m)}}, \quad \rho_{(i)0} \quad (i = d, m) \text{ — плотность соответствующего газа при}$$

давлении p_0 .

Для получения аналитического решения воспользуемся методом линеаризации Лейбензона, согласно которому переменное давление в коэффициенте пьезопроводности примем постоянным и равным исходному давлению p_0 . Тогда, учитывая, что в каждой из двух областей гидратонасыщенность постоянна, решения могут быть записаны в виде:

$$p_{(1)}^2 = p_{(n)}^2 + \frac{Q\mu_{(d)}R_{g(d)}T_w}{2\pi k_{(d)}} \int_{\xi}^{\xi_{(n)}} \frac{1}{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(1)}}\right) d\xi \quad (0 < \xi < \xi_{(n)}), \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
 T_{(1)} &= T_{(n)} + \frac{(T_w - T_{(n)}) \int_{\xi}^{\xi_{(n)}} \frac{1}{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{\text{Pe}_{(1)} p_{(1)}^2}{p_0^2}\right) d\xi}{\int_0^{\xi_{(n)}} \frac{1}{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{\text{Pe}_{(1)} p_{(1)}^2}{p_0^2}\right) d\xi}, \\
 p_{(2)}^2 &= p_0^2 + \frac{(p_{(n)}^2 - p_0^2) \int_{\xi}^{\infty} \frac{1}{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(2)}}\right) d\xi}{\int_{\xi_{(n)}}^{\infty} \frac{1}{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(2)}}\right) d\xi} \quad (\xi_{(n)} < \xi < \infty), \\
 T_{(2)} &= T_0 + \frac{(T_{(n)} - T_0) \int_{\xi}^{\infty} \frac{1}{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{\text{Pe}_{(2)} p_{(2)}^2}{p_0^2}\right) d\xi}{\int_{\xi_{(n)}}^{\infty} \frac{1}{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{\text{Pe}_{(2)} p_{(2)}^2}{p_0^2}\right) d\xi},
 \end{aligned} \tag{6}$$

где $\eta_{(j)} = \chi_{(j)}^{(p)} / \chi^{(T)}$ ($j = 1, 2$).

На основе условий (3), с учетом построенных решений (5) и (6) можно записать соотношения уравнения для определения координаты границы фазовых переходов ($\xi = \xi_{(s)}$) и значений параметров на ней:

$$\begin{aligned}
 \frac{QR_{g(d)} T_w}{2\pi} \exp\left(-\frac{\xi_{(n)}^2}{4\eta_{(1)}}\right) &= m\chi^{(T)} p_{(n)} A_{(1)} \xi_{(n)}^2, \\
 \frac{(p_{(n)}^2 - p_0^2) \exp\left(-\frac{\xi_{(n)}^2}{4\eta_{(2)}}\right)}{\int_{\xi_{(n)}}^{\infty} \frac{1}{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(2)}}\right) d\xi} &= \frac{m\chi^{(T)} \mu_{(d)} p_{(n)} A_{(2)}}{k_{(d)}} \xi_{(n)}^2, \\
 \frac{(T_{(n)} - T_0) \exp\left(-\frac{\xi_{(n)}^2}{4} - \frac{\text{Pe}_{(2)} p_{(n)}^2}{p_0^2}\right)}{\int_{\xi_{(n)}}^{\infty} \frac{1}{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{\text{Pe}_{(2)} p_{(2)}^2}{p_0^2}\right) d\xi} &- \frac{(T_w - T_{(n)}) \exp\left(-\frac{\xi_{(n)}^2}{4} - \frac{\text{Pe}_{(1)} p_{(n)}^2}{p_0^2}\right)}{\int_0^{\xi_{(n)}} \frac{1}{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{\text{Pe}_{(1)} p_{(1)}^2}{p_0^2}\right) d\xi} = B \xi_{(n)}^2,
 \end{aligned} \tag{7}$$

$$\text{где } A_{(1)} = \frac{\rho_{h(d)} S_{h(d)} G_{(d)}}{\rho_{(d)0}} + 1 - S_{h(d)}, \quad A_{(2)} = \frac{\rho_{h(m)} S_{h(m)} G_{(m)}}{\rho_{(m)0}} + 1 - S_{h(m)},$$

$$B = \frac{m(\rho_{h(d)} S_{h(d)} L_{h(d)} - \rho_{h(m)} S_{h(m)} L_{h(m)})}{2\rho c}.$$

Результаты расчетов

Полученные решения исследовались на выполнение термодинамического условия существования во второй области гетерогенной смеси «метаногидрат-метан», которое состоит в том, что локальная температура во второй области должна быть ниже локальной температуры диссоциации гидрата CH_4 , вычисляемой из формулы (2) по найденному в процессе решения распределению давления.

На рис. 1 приведены распределения температуры и давления для разных значений массового расхода Q . Для параметров, характеризующих систему, приняты следующие значения: $m = 0,2$, $\nu = 0,5$, $T_0 = T_w = 274$ К, $p_0 = 3$ МПа, $k_0 = 10^{-13}$ м², $G_{(d)} = 0,28$, $G_{(m)} = 0,13$, $\rho c = 2,5 \cdot 10^6$ Дж/(К·кг), $\lambda = 2$ Вт/(м·К), $\rho_{h(d)} = 1100$ кг/м³, $\rho_{h(m)} = 900$ кг/м³, $c_{(d)} = 800$ Дж/(К·кг), $c_{(m)} = 1560$ Дж/(К·кг), $\mu_{(d)} = 1,5 \cdot 10^{-5}$ Паус, $\mu_{(m)} = 10^{-5}$ Паус, $R_{g(d)} = 188$ Дж/(К·кг), $R_{g(m)} = 520$ Дж/(К·кг), $L_{h(d)} = 4,1 \cdot 10^5$ Дж/кг, $L_{h(m)} = 4,5 \cdot 10^5$ Дж/кг, $T_* = 10$ К, $p_{s0} = 2,86$ МПа. Пунктирные линии показывают равновесные температуры диссоциации гидрата метана.

Из рис. 1 видно, что при высоких значениях массового расхода (случай *a*) температура пласта (линия 1) во второй области ниже равновесной температуры диссоциации гидрата метана (линия 2). Следовательно, в этом случае решение с одной границей фазовых переходов дает адекватное математическое описание процесса. При более низком значении массового расхода нагнетаемого диоксида углерода (случай *b*) температура пласта за границей фазовых переходов (во второй области) на некотором узком участке поднимается выше равновесной температуры разложения гидрата метана, что соответствует перегреву гетерогенной смеси метана и его гидрата на этом участке. Следовательно, в этом случае необходимо вводить вторую границу фазовых переходов, на которой происходит разложение гидрата метана на метан и воду, и, соответственно, вводить промежуточную область, частично насыщенную свободной водой.

Реализация режима с двумя фронтальными границами фазовых переходов обусловлена нагревом пористой среды из-за выделения скрытой теплоты фазовых переходов. Максимальное значение температуры на границе фазовых переходов следующее:

$$T_{(n)\max} = T_0 + m(\rho_{h(d)} S_{h(d)} L_{h(d)} - \rho_{h(m)} S_{h(m)} L_{h(m)}) / \rho c.$$

Минимальное значение равновесной температуры диссоциации гидрата метана определяется из формулы (2):

$$T_{(s)} = T_0 + T_* \ln(p_0 / p_{s0}).$$

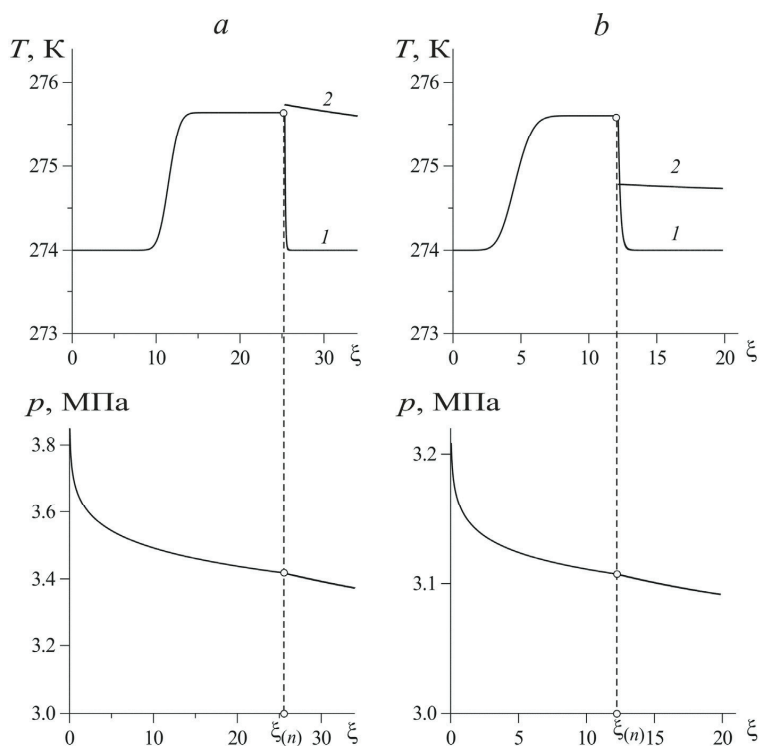


Рис 1. Распределение по автомодельной переменной ξ температуры и давления при нагнетании в пласт CO_2 с массовым расходом 0,30 кг/(м с) (а) и 0,05 кг/(м с) (б)

Необходимое условие возникновения свободной воды можно записать следующим образом:

$$T_* \ln(p_0/p_{s0}) < m(\rho_{h(d)} S_{h(d)} L_{h(d)} - \rho_{h(m)} S_{h(m)} L_{h(m)}) / \rho c.$$

Исследуем критические условия, определяющие реализацию того или иного режима в случае, когда исходное пластовое давление p_0 удовлетворяет вышеуказанному неравенству.

Необходимое и достаточное условие существования решения с двумя границами фазовых переходов определяется неравенством:

$$T_{(s)} < T_{(n)},$$

где $T_{(n)}$ — температура на границе фазовых переходов, вычисляемая из третьего выражения системы (7).

На основе данного неравенства были проведены вычислительные эксперименты в широком диапазоне параметров для определения критического значения массового расхода нагнетаемого газа Q_* , ниже которого происходит диссоциация гидрата CH_4 на составляющие. Установлено, что основными параметрами, которые влияют на величину Q_* , являются проницаемость пласта и исходное пластовое давление.

Так, из рис. 2а видно, что при увеличении проницаемости величина Q_* возрастает, причем чем ниже исходное пластовое давление, тем рост быстрее. Таким образом, режим с одной границей фазовых переходов реализуется в низкопроницаемых средах, а также в случае высоких значений начального давления в пласте.

Для объяснения этого результата приведен рис. 2б, согласно которому с увеличением проницаемости и уменьшением массового расхода снижается давление на границе фазовых переходов, следовательно, уменьшается равновесная температура диссоциации метаногидрата на воду и метан. Таким образом, факт реализации режима с двумя границами фазовых переходов в случаях высокопроницаемой пористой среды и низких значениях массового расхода обусловлен тем, что при данных условиях давление на границе фазовых переходов оказывается ниже равновесного давления диссоциации гидрата метана, соответствующего температуре на этой границе.

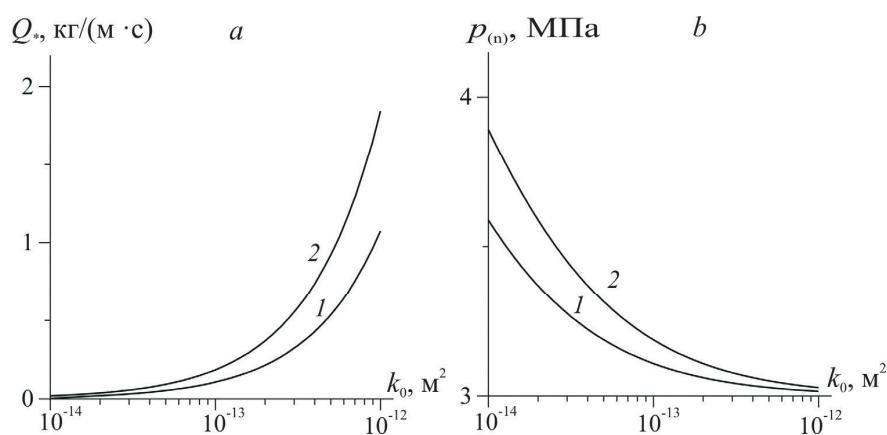


Рис. 2. Зависимость критического значения массового расхода (а) и давления на границе фазовых переходов (б) от абсолютной проницаемости пласта k_0 .

Линии 1 и 2 на левом рисунке соответствуют $p_0 = 3,1$ и $3,0$ МПа, на правом — $Q = 0,05$ и $0,1$ кг/(м с)

Закключение

Анализ полученных решений показывает, что в случае нагнетания углекислого газа с постоянным массовым расходом в пласт, насыщенный метаном и его гидратом, в зависимости от массового расхода и параметров, характеризующих исходное состояние системы, возможно либо образование только гидрата диоксида углерода, либо, помимо него, образование смеси метана и воды. Второй режим реализуется, когда начальное состояние системы близко к условиям разложения гидрата метана на составляющие при условии высокой проницаемости среды и низкого массового расхода закачиваемого диоксида углерода. Для величины массового расхода инъекции существует некоторое критическое значение, зависящее от проницаемости и начального давления в пласте, при превышении которого процесс происходит без образования гетерогенной смеси «метан-вода».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бык С. Ш. Газовые гидраты / С. Ш. Бык, Ю. Ф. Макогон, В. И. Фомина. М.: Химия, 1980. 296 с.
2. Истомин В. А., Якушев В. С. Газовые гидраты в природных условиях / В. А. Истомин, В. С. Якушев. М.: Недра, 1992. 236 с.
3. Макогон Ю. Ф. Природные газовые гидраты: распространение, модели образования, ресурсы / Ю. Ф. Макогон // Российский химический журнал. 2003. Т. XLVII, № 3. С. 70-79.
4. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред / Р. И. Нигматулин. М.: Наука, 1987.
5. Цыпкин Г. Г. Течения с фазовыми переходами в пористых средах / Г. Г. Цыпкин. М.: Физматлит, 2009. 232 с.
6. Цыпкин Г. Г. Математическая модель инъекции углекислого газа в пласт с образованием гидрата сред / Г. Г. Цыпкин // Доклады Академии наук: 2014. Т. 458. № 4. С. 422-425; 2009. Т. 50, № 4. С. 100-111.
7. Шагапов В. Ш. О возможности вымывания газа из газогидратного массива посредством циркуляции теплой воды / В. Ш. Шагапов, А. С. Чиглинцева, В. Р. Сыртланов // Прикладная механика и техническая физика. 2009. Т. 50. № 4. С. 100-111.
8. Ji C. Natural gas production from hydrate decomposition by depressurization / C. Ji, G. Ahmadi, D. H. Smith // Chem. Eng. Sci. 2001. Vol. 56. Pp. 5801-5814.
9. Qing Yuan. Methane recovery from natural gas hydrate in porous sediment using pressurized liquid CO₂ / Qing Yuan, Chang-Yu Sun, Bei Liu, Xue Wang, Zheng-Wei Ma, Qing-Lan Ma, Lan-Ying Yang, Guang-Jin Chen, Qing-Ping Li, Shi Li, Ke Zhang // Energy Conversion and Management. 2013. Vol. 67. Pp. 257-264.
10. Shagapov V. Sh. Formation of gas hydrates in a porous medium during an injection of cold gas / V. Sh. Shagapov, N. G. Musakaev, M. K. Khasanov // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015. Vol. 84. Pp. 1030-1039.

REFERENCES

1. Byk S. Sh., Makogon Ju. F., Fomina V. I. Gazovye gidraty [Gas Hydrates]. M.: Himija [Chemistry], 1980. 296 p. (In Russian)
2. Istomin V. A., Jakushev V. S. Gazovye gidraty v prirodnyh usloviyah [Gas Hydrates in Nature]. M.: Nedra, 1992. 236 p. (In Russian)
3. Makogon Ju. F. Prirodnye gazovye gidraty: rasprostranenie, modeli obrazovaniya, resursy [Natural Gas Hydrates: Distribution, Models of Formation, Resources] // Rossijskij himicheskij zhurnal [Russian Chemical Journal]. 2003. Vol. XLVII, No 3. Pp. 70-79. (In Russian)
4. Nigmatulin R. I. Dinamika mnogofaznyh sred [Dynamics of Multiphase Media]. M.: Nauka [Science], 1987. (In Russian)
5. Tsyppkin G. G. Tehenija s fazovymi perehodami v poristyh sredah [Flows with Phase Transitions in Porous Media]. M.: Fizmatlit, 2009. 232 p. (In Russian)
6. Tsyppkin G. G. Matematicheskaja model' inzhekcii uglekislogo gaza v plast s obrazovaniem gidrata [Mathematical Model of Carbon Dioxide Injection into Reservoir with Hydrate Formation] // Doklady Akademii nauk [Proceedings of Academy of Sciences]: 2014. Vol. 458. No 4. Pp. 422-425; 2009. Vol. 50. No 4. Pp. 100-111. (In Russian)
7. Shagapov V. Sh., Chiglintseva A. S., Syrtlanov V. R. O vozmozhnosti vymyvaniya gaza iz gazogidratnogo massiva posredstvom cirkuljacii teploj vody [Possibility of

- Gas Washout from a Gas-hydrate Massif by Circulation of Warm Water] // Prikladnaja mehanika i tehničeskaja fizika [Applied Mechanics and Technical Physics]. 2009. Vol. 50. No 4. Pp. 100-111. (In Russian)
8. Ji C., Ahmadi G., Smith D.H. Natural gas production from hydrate decomposition by depressurization // Chem. Eng. Sci. 2001. Vol. 56. Pp. 5801-5814.
 9. Qing Yuan, Chang-Yu Sun, Bei Liu, Xue Wang, Zheng-Wei Ma, Qing-Lan Ma, Lan-Ying Yang, Guang-Jin Chen, Qing-Ping Li, Shi Li, Ke Zhang Methane recovery from natural gas hydrate in porous sediment using pressurized liquid CO₂ // Energy Conversion and Management. 2013. Vol. 67. Pp. 257-264.
 10. Shagapov V. Sh., Musakaev N. G., Khasanov M. K. Formation of gas hydrates in a porous medium during an injection of cold gas // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015. Vol. 84. Pp. 1030-1039.

Авторы публикации

Мусакаев Наиль Габсалимович — доктор физико-математических наук, профессор Тюменского государственного университета, заведующий лабораторией Тюменского филиала Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН

Хасанов Марат Камилович — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики и механики Стерлитамакского филиала Башкирского государственного университета

Authors of the publication

Nail G. Musakaev — Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor at the Tyumen State University, Head of Laboratory of Tyumen Branch of Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch of Russian Academy of Science

Marat K. Khasanov — Cand. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor at the Department of Applied Mathematics and Mechanics, Sterlitamak Branch of Bashkir State University